

1. Для передач степени точности выше 6-й применять продольную модификацию поверхностей зубьев не следует.

2. Для передач степеней точности 6...12 можно ориентировочно руководствоваться рекомендательными данными из таблицы 3, в которой  $\lambda_F$  и  $\lambda_H$  показывают, во сколько раз снижается соответственно изгибная и контактная напряжённость модифицированных зубьев по сравнению с немодифицированными ( $\delta_T = 0$ ) при прочих равных условиях.

Таблица 3 – Ориентировочные рекомендации по назначению величины  $\delta_T$

Степень точности по [7]	Рекомендуемое значение $\delta_T$ в долях модуля $m_t$	$\lambda_F$	$\lambda_H$
6...8	0,008...0,011	до 1,4	до 1,1
9...10	0,014...0,020	1,6...1,8	1,2...1,4
11	0,035	до 2	до 1,6
12	свыше 0,045	свыше 2	свыше 1,6

Таким образом, продольная модификация поверхностей арочных зубьев является мощным инструментом снижения их напряжённости, при этом эффект тем больше, чем ниже точность передачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 10-08-00031

**Список литературы:** 1. Догода М.И., Еремин В.Е., Догода А.И. Разработка и освоение высоконагруженных арочных передач и средств для их производства // Вестник машиностроения. – 1990. – №9. – С.41-44. 2. Зубчатые передачи. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Е.Г. Гинзбурга. – Л.: Машиностроение. – 1980. – 416с. 3. Павленко А.В., Федякин Р.В., Чесноков В.А. Зубчатые передачи с зацеплением Новикова. – Киев: Техніка, 1978. – 144с. 4. Короткин В.И., Онишников Н.П., Харитонов Ю.Д. Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 384с. 5. Айрапетов Э.Л., Городничий В.П., Ерихов М.Л., Сызранцев В.Н. Нагруженность цилиндрических передач с арочными зубьями // Вестник машиностроения. – 1986. – №2. – С.20-22. 6. Заблонский К.И. Зубчатые передачи. Распределение нагрузки в зацеплении. – Киев: Техніка, 1977. – 208с. 7. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 69с. 8. Беляев А.И., Сирицын А.И., Сирицын Д.А. Результаты испытаний арочных зубьев колёс на износ и сопротивление усталости при изгибе // Вестник машиностроения. – 1997. – №1. – С.6-8.

Поступила в редколлегию 04.05.11

УДК 621.771

П.В. КРОТ, к.т.н., ИЧМ им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепрпетровск

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЛИНИЯХ ПРИВОДА СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Выполнены теоретические исследования и разработана система мониторинга динамических нагрузок в линиях привода станов горячей прокатки. Разработаны динамические модели и программное обеспечение, позволяющие формировать базы данных о накопленных циклах нагрузок и отказах элементов линии привода и представлять статистическую информацию в удобном виде для принятия решений в подразделениях по эксплуатации прокатных станов.

Виконано теоретичні дослідження і розроблено систему моніторингу динамічних навантажень у лініях приводу станів гарячої прокатки. Розроблені динамічні моделі та програмне забезпечення, що дозволяють формувати бази даних про накопичені цикли навантажень та відмови елементів лінії приводу й представляти статистичну інформацію у зручному вигляді для прийняття рішень у підрозділах з експлуатації прокатних станів.

Theoretical research has been carried out and monitoring system is developed of the dynamic loads in the drivelines of hot rolling mills. Dynamic models and software are developed, which allow to support databases with history of loading cycles and failures of driveline elements and to represent statistical information in convenient form for decision making in maintenance departments of rolling mills.

**Введение.** Согласно действующим правилам технической эксплуатации станов горячей прокатки [1], их текущее обслуживание, включающее замены узлов и деталей, производится на основе планово-предупредительных ремонтов (ППР) по текущим величинам износа, как основного параметра технического состояния оборудования (ТСО). При назначении сроков ППР учитывают общий износ в виде полных угловых и радиальных зазоров, хотя только открытая их часть, зависящая от текущих настроек и конструктивных особенностей линий привода, определяет динамические нагрузки, приводящие к наиболее частым поломкам и отказам оборудования. Если зазор оказывается закрытым к моменту приложения нагрузки и не раскрывается при последующих колебаниях, то он никак не влияет на динамику системы и не может быть критерием для выполнения текущего ремонта. С другой стороны, открытая часть зазоров влияет на пиковые нагрузки, но не является критерием для назначения сроков технического обслуживания или замены узлов. Возникающее противоречие с правилами технической эксплуатации может быть разрешено в автоматизированной системе мониторинга, реализующей функции диагностики, как полной величины зазоров, так и открытой части [2]. Однако, такие измерения на крупногабаритном прокатном оборудовании сложной технической задачей в связи с изменчивым характером проявления зазоров и многими факторами, влияющими на величину их открытой части.

**Анализ публикаций.** За рубежом широко применяются автоматизированные системы управления активами на предприятиях (EAM – Enterprise As-

set Management), которые в основном выполняют функции планирования загрузки ремонтных цехов и формирования заказов на закупку запасных частей с учетом необходимого резервирования. Наблюдение за технологией и оборудованием, включая прогнозирование остаточного ресурса отдельных узлов прокатных станов, реализуется на основе телеметрических измерителей крутильных моментов и датчиков вибрации, установленных в отдельных точках по линии привода, например, в системе фирмы SMS Siemag (PPMS – Plant and Process Management System) [3] или разрабатываемой в России [4]. Большинство же систем мониторинга используют токовые сигналы электроприводов [5], которые более доступны для регистрации стандартными техническими средствами. Некоторое приближение к реальным уровням механических нагрузок дают специальные методы обработки токовых сигналов электроприводов, предложенные в работе [6], но только если контуры регулирования имеют достаточно высокую частоту среза, включающую диапазон первых двух собственных частот линии привода.

В станах горячей прокатки по условиям работы наблюдается большая по отношению ко всему циклу прокатки продолжительность переходных процессов при захватах, выбросах и ударах раската на транспортирующем рольганге. Это вызывает колебания элементов линии привода и создает определенные трудности применения стандартных средств и методов диагностики [7] на прокатных станах, особенно зазоров. Предложены методы диагностики износа в переходных режимах [8, 9]. Экспериментальные исследования, выполненные на нескольких станах горячей и холодной прокатки, показали, что измерение суммарных зазоров может быть выполнено датчиками угловых положений магнитного или оптического типа, установленными на элементах линии привода в стационарном или съемном исполнении. С другой стороны, по параметрам колебаний на собственных частотах можно не только судить о величинах пиковых нагрузок, но и диагностировать зазоры [10].

**Постановка проблемы.** Измерение токовых или механических нагрузок на одном из валов не позволяет получать достоверные данные о динамических нагрузках в различных элементах редукторных линий привода прокатных станов. В отличие от систем без редукторов, динамика может в несколько раз отличаться по сравнению с точкой, где установлен стационарный измеритель моментов (обычно на шпинделях или моторном валу). Поэтому необходимы динамические модели для оценки нагрузок в недоступных для измерения точках по линии привода. Алгоритмы системы мониторинга должны учитывать влияние настроек оборудования (шпиндельных узлов), параметров прокатки (соотношения скорости и уровня раската по отношению к валкам) и текущий износ элементов привода в виде угловых и радиальных зазоров, что требует реализации функций диагностики. Это позволит адаптировать параметры нелинейной динамической модели для более точного расчета накопленных повреждений и одновременно планировать сроки обслуживания кле-

тей. Технические средства измерений моментов и зазоров должны функционировать в тяжелых условиях прокатного производства и основываться на бесконтактном принципе передачи данных и питания.

**Цель исследования.** Целью исследований является разработка математического и программного обеспечения, технических средств измерения моментов, составляющих основу стационарных автоматизированных систем мониторинга и диагностики линий привода прокатных станов. Принципы построения и функционирования таких систем должны обеспечивать надежную эксплуатацию прокатных станов под действием нестационарных технологических нагрузок и повышенном уровне износа оборудования.

**Методы решения задачи.** Основная идея разработанных методов мониторинга и диагностики состоит в использовании нелинейных свойств механических систем прокатных станов, которые при наличии зазоров искажают пропорциональную (для линейных систем) зависимость выходных (измеряемых) сигналов от входных воздействий (статической нагрузки на валках). Для расчета идеальных характеристик линейных систем (эталонных образов) и их изменений при появлении износа (зазоров) применяются динамические модели. В качестве информативных параметров для оценки динамических нагрузок и диагностики зазоров использованы: амплитуда и фаза сигнала момента и вибрации в диапазоне собственных частот, значения самих частот, изменяющихся при появлении нелинейностей, декремент свободных колебаний, отклонения статистических характеристик нагрузки, зависимость динамического отклика от статической нагрузки. Отличием разработанной системы является использование динамической модели, включающей адаптацию ее параметров по данным измерения податливости участков линий привода и их текущего износа в виде зазоров.

**Интерфейс и функции системы мониторинга нагрузок\*.** При проектировании системы исходили из того, что повышение надежности прокатного оборудования может быть достигнуто только с помощью стационарных автоматизированных систем, включающих функции управления техническим обслуживанием и ремонтами (АСУ ТОиР). Система разрабатывалась согласно конструкции черновых и чистовых клетей широкополосного стана горячей прокатки 1680 ОАО "Запорожсталь", но может быть адаптирована к любому составу оборудования. В первую очередь, предусмотрена визуализации основных элементов линии привода клетки кварто, включающей шпиндели, шестеренную клетку, редуктор и электродвигатель. По каждой из клетей и отдельным элементам линии привода персонал может оперативно получать информацию, которая представлена (см. Рисунок 1) для одной из муфт моторного

\* Программное обеспечение разработано совместно с м.н.с. Соловьевым К.В.

вала. Наряду со статистической информацией по заменам данного узла или детали, наработке и текущему износу могут строиться также графики переходных процессов в различных местах линии привода на основе расчета по модели системы и данных измерений износа элементов привода.

Накопленные за время эксплуатации прокатного стана данные о циклах нагрузок используются для построения статистических распределений напряжений в основных деталях (см. Рисунок 2). По этим данным система производит расчет вероятности наступления отказа по соотношению накопленных циклов максимальных нагрузок ( $\sigma_{max}$ ) заданного поставщиком оборудования допустимому пределу ( $\sigma_{lim}$ ). Статистические параметры свойств материала зацеплений редуктора и других элементов ( $\sigma_{lim}$ ) устанавливаются по данным поставщика оборудования в пределах 15-20% или путем измерений фактической твердости поверхности по длине зубьев и по периметру шестерен.

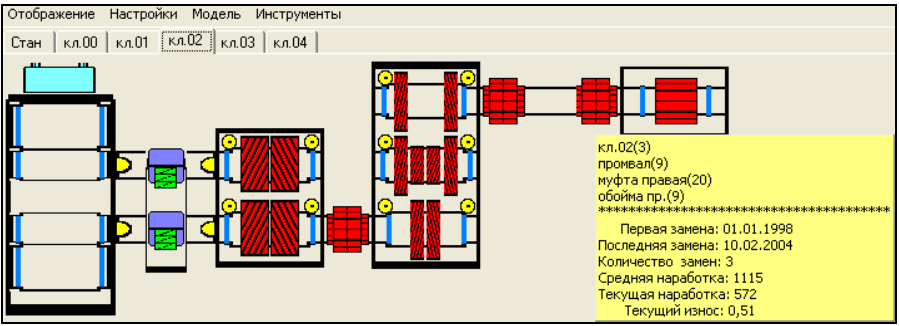


Рисунок 1 – Окно визуализации линии привода клетки с данными по износу и ресурсу

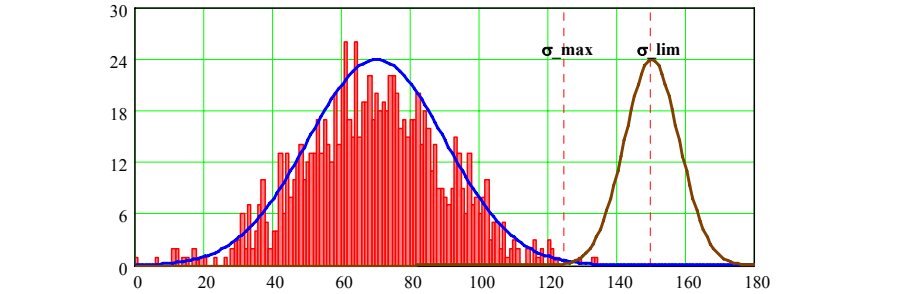


Рисунок 2 – График распределений максимальных значений момента сил упругости:  
 $\sigma_{max}$  – максимальная нагрузка ( $3\sigma$ );  $\sigma_{lim}$  – средняя допустимая нагрузка

В системе реализована поддержка базы данных по учету отказов и сроков замены деталей и узлов. Структура базы данных системы разрабатывалась совместно со службой эксплуатации стана 1680 и учитывает специфику проведения ремонтных воздействий и соответствует терминологии записей агрегатных журналов (см. Рисунок 3). Используются следующие виды воз-

действий на оборудование: 1) ввод в действие; 2) текущий ремонт; 3) капитальный ремонт; 4) аварийный ремонт. Структура оборудования имеет четыре уровня: 1) клеть; 2) агрегат; 3) узел; 4) деталь. Причины отказов классифицированы в три вида: 1) технологические; 2) конструктивные; 3) эксплуатационные. Отказы ранжированы по степени тяжести тремя уровнями: 1) повреждение; 2) поломка; 3) отказ. База данных может быть расширена на любое количество клетей стана и вспомогательное оборудование (моталки, ножицы, эджеры, рольганги). Запросы формируются на основе языка SQL, который легко поддается интерпретации и может быть использован персоналом службы эксплуатации. Например, строятся запросы такого вида:

- ресурс подшипников одного вида на разных валах редукторов;
- ресурс зубчатых зацеплений входных валов редукторов в клетях;
- периодичность обтяжки болтовых креплений на опорах валов;
- периодичность замены вкладышей на шпинделях.

Ремонт:[C:\ИЧМ\KIRILL\RepairTable\rem01.DB]

Файл Окно О программе

Дата	Вид ремонта	Клеть	Агрегат	Узел	Деталь	Вид отказа	Вид работ
25.09.2003	аварийный	кл.03	-	-	-	-	-
25.09.2003	аварийный	кл.03	клеть прокатная	валок рабочий верхний	-	поломка	-
25.09.2003	аварийный	кл.03	шпиндельное устройство	шпиндель нижний	-	поломка	-
25.09.2003	аварийный	кл.03	шпиндельное устройство	стойки	-	повреждение	-
12.02.2004	аварийный	кл.03	-	-	-	перегрузка	-
12.02.2004	аварийный	кл.03	клеть прокатная	валок рабочий верхний	муфта	поломка	замена
12.02.2004	аварийный	кл.03	клеть прокатная	валок рабочий нижний	-	поломка	замена
12.02.2004	аварийный	кл.03	шпиндельное устройство	шпиндель нижний	-	поломка	замена
12.02.2004	аварийный	кл.03	шпиндельное устройство	стойки	-	повреждение	замена
12.02.2004	аварийный	кл.03	шпиндельное устройство	шпиндель верхний	-	поломка	замена

Рисунок 3 – Окно визуализации и ввода информации в базе данных отказов и ремонтов элементов оборудования прокатного стана (выбран фильтр вида ремонта "аварийный", агрегат "кл. 03")

В системе предусмотрено формирование отчетов по данным о нагрузках:

- диаграммы нагрузок по различным видам сортамента;
- загрузка оборудования клетей по мощности прокатки и времени;
- статистика нагрузок для каждого элемента линий привода;
- прогноз износа и остаточного ресурса оборудования;
- поиск сортамента с превышением допустимого уровня нагрузок.
- построение трендов уровней вибрации в частотных диапазонах;
- выдача аварийных предупреждений по уровням нагрузок.

Система определяет фактический ресурс и износ элементов оборудования на момент измерения вибрации, а также выводит значения кинематических частот зубчатых зацеплений и подшипников качения валков, шестерен-

ных клетей и редукторов. Использование накопленной статистики о нагрузках при анализе записей вибрации существенно ускоряет адаптацию методов диагностики и облегчает построение прогнозных моделей отказов.

**Методы анализа и представления нагрузок.** Эффективность анализа технологических нагрузок зависит от формы их представления пользователям системы и учета специфики процессов прокатки. Пример обработки данных показан для клетки дуо стана 1680 (см. Рисунок 4). Правая шкала графика соответствует количеству слэбов, прокатанных при данном уровне статической нагрузки (средней по слэбу), а левая шкала – это нагрузка привода, измеренная на моторном валу. Большую роль при этом играет алгоритм выбора значений для построения графиков нагрузок: мгновенные значения (исходные данные); средние значения по длине слэба, по одной плавке или группе плавков одного сортамента; по всему сортаменту за определенный период времени. Расчеты показали, что в качестве представительной выборки при расчетах прочности и долговечности оборудования клетей достаточно взять недельный интервал времени работы.

Анализ средних значений нагрузок по длине слэба внутри одной плавки характеризует стабильность нагрева слэбов. Средние значения по плавкам одного сортамента показывают, в чем причина возможных перегрузок: неправильная схема обжатий или нарушения в режимах нагрева или задержки при транспортировке слэбов по рольгангу. Чем большее количество слэбов фиксируется с превышением нагрузок (вертикальные столбцы на Рисунок 4) на одном из номеров сортамента (выведены по горизонтальной оси и определяется в отдельной таблице), тем больше вероятность неправильной схемы обжатий, а не разовых выбросов нагрузки при низкой температуре металла.

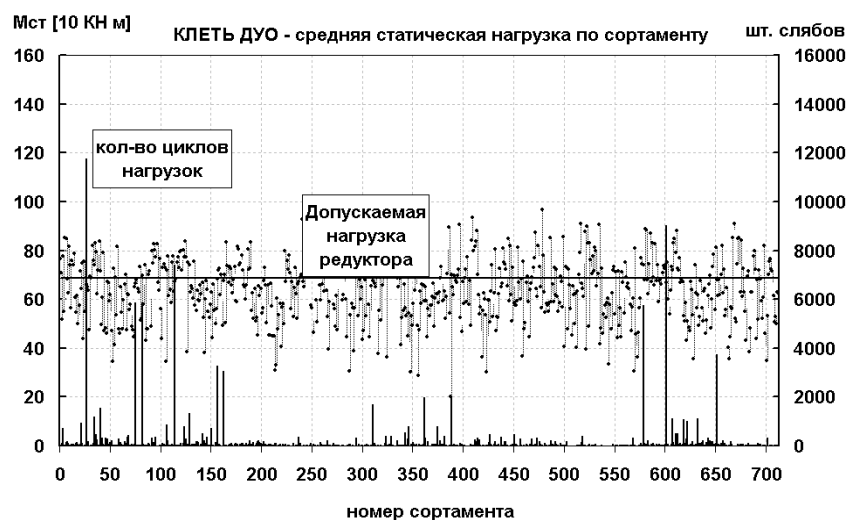


Рисунок 4 – Средняя по слэбам статическая нагрузка в клетии дуо стана 1680

Статистический анализ нагрузок на различном сортаменте позволяет оценить влияние отклонений в технологическом режиме прокатки на отказы отдельных узлов и совершенствовать (изменять) режимы прокатки по условиям надежности стана, снизить аварийные поломки и повысить эффективность эксплуатации оборудования.

Идентификация причин повышенных нагрузок на основе реальных данных измерений проводится, как во временной, так и в частотной области (по амплитудным и фазовым частотным характеристикам системы). В качестве примера на Рисунок 5а приведены расчетная амплитудная частотная характеристика (АЧХ) по каналу "момент на валках – момент на входе редуктора" и спектр технологической нагрузки на рабочих валках в клетии дуо стана 1680. Построения для остальных клетей выполняются аналогично. Фазовые характеристики показывают места наибольших нагрузок по линии привода, соответствующие узлам крутильных колебаний по первым формам. В узлах колебаний, если они попадают в зубчатые зацепления, происходит раскрытие зазоров в переходных режимах нагрузок. Применение такого представления данных в большей степени соответствует задачам динамического анализа механических систем, чем обычное распределение нагрузок, представленное на Рисунок 5б или применяемые для расчета цикловой прочности оборудования кривые Вёллера. Термин "спектр нагрузки" применяется, как правило, для обычного распределения, которое показывает рассеяние нагрузки только по одному из параметров – амплитуде (вертикальная ось на Рисунок 5а). Второй важный параметр – время нарастания нагрузки, или обратная ей величина – частота, остается неучтенным (горизонтальная ось на Рисунок 5а), хотя существенно влияет на динамику линии привода.

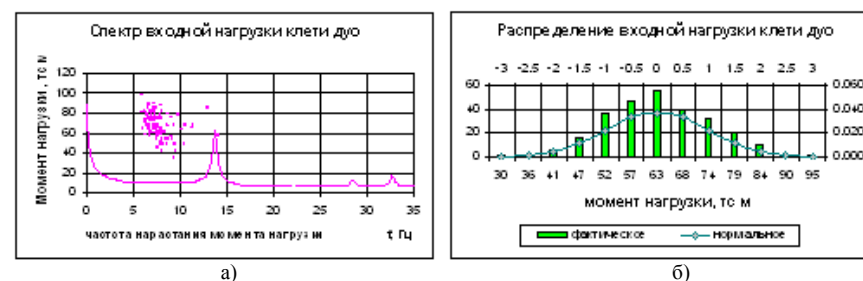


Рисунок 5 – Спектр технологической нагрузки в клетии дуо стана 1680:

- а) спектр входной нагрузки и расчетный график АЧХ линии привода;
- б) стандартное распределение входной нагрузки

В реальных условиях нагрузка на валках прикладывается за время заполнения очага деформации металлом. На Рисунок 6 приведены расчетные зависимости нагрузки по различным участкам линии привода от времени нарастания момента прокатки. Левая граница графиков соответствует мгновенному захвату. Правый график по оси абсцисс размечен по частоте ( $f=1/2T$ , где

$T$  – время нарастания нагрузки при захвате). Согласно статистике по обжати-  
ям и скорости валков в черновой группе клетей стана 1680, время захвата со-  
ставляет: 0,13; 0,14; 0,12; 0,06 и 0,03с.

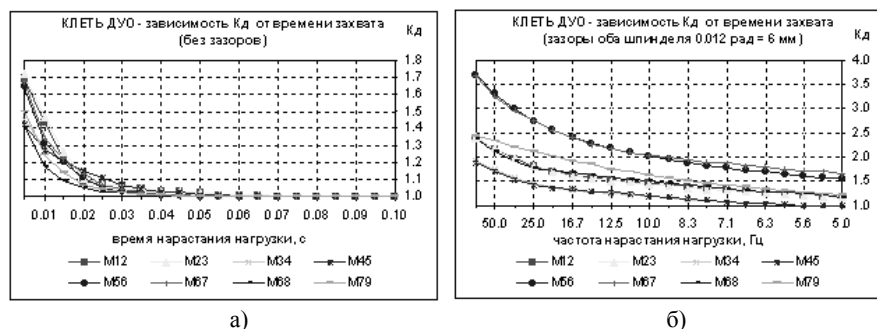


Рисунок 6 – Зависимость  $K_d$  по линии привода от времени захвата:  
а) система без зазоров (эталон); б) система с зазорами в обоих шпинделях (0,012рад=6мм)

В среднем из-за увеличения времени захвата по клетям максимальные нагрузки в два раза меньше, чем при ступенчатом воздействии, но наибольшее увеличение нагрузок (в 2 раза) наблюдается при малом времени захвата (до 0,02с). С увеличением времени захвата (уменьшением частоты), например в последних клетях, увеличение нагрузок от зазоров меньше (в 1,5 раза). Спектр нагрузки в его динамическом толковании позволяет системно оценивать влияние технологических факторов и находить оптимальные пути снижения перегрузок. При попадании области рассеяния нагрузок в спектре на одну из первых собственных частот линии привода клетки, разброс динамической нагрузки существенно возрастает [11]. Время нарастания момента прокатки можно изменить (сместить частоту воздействия) несколькими технологическими способами:

- изменением (перераспределением) обжатий по клетям;
- повышением температуры передней кромки раската;
- формированием фигурной передней кромки раската;
- изменением скорости захвата раската или ускорением привода.

С ростом обжатия изменяется как амплитуда статической нагрузки, так и время ее нарастания при захвате, поэтому данный способ требует более сложных построений, чем остальные. Формирование фигурной передней кромки раската требует конструктивных изменений оборудования станов, а изменение скорости захвата требует постоянного согласования скорости валков и рольганга, что мало приемлемо на практике. Наиболее простым и опробованным на практике способом является автоматическое включение системы гидросбива окалины после прохождения передней кромки слэбов на длину очага деформации (50-150мм). При этом качество поверхности металла не ухудшается, а нагрузки снижаются на 20-30%.

**Совершенствование методов расчета динамических нагрузок.** Распределение нагрузок по линии привода определяется формами колебаний по низшим собственным частотам крутильной системы. Узлы колебаний соответствуют максимальным крутильным нагрузкам и уровням сигнала в линии привода. В качестве примера представлена зависимость динамической нагрузки ( $K_d$ ,  $M_{max}$ ) по участкам линии привода клетки дуо стана 1680, с двумя одноступенчатыми редукторами в зависимости от зазоров в шпинделях (см. Рисунок 7). Кривые получены путем численного моделирования системы. Демпфирование принято линейно зависящим от скорости закручивания вала с одинаковым коэффициентом для всех упругих связей. Соответствие номеров по оси абсцисс: 1 – моторный вал, 2 – зацепление первого редуктора, 3 – промежуточный вал между редукторами, 4 – зацепление второго редуктора, 5 – коренная муфта, 6 – зацепление шестеренной клетки, 7 – нижний шпиндель, 8 – верхний шпиндель. На графике Рисунок 7а нижняя кривая – система без зазоров, верхняя – зазоры в обоих шпинделях 0,012рад (6мм). На графике Рисунок 7б нижняя кривая – статическая нагрузка, верхние кривые – максимальный момент сил упругости по линии при тех же зазорах в шпинделях, что и на левом графике (0...6мм).

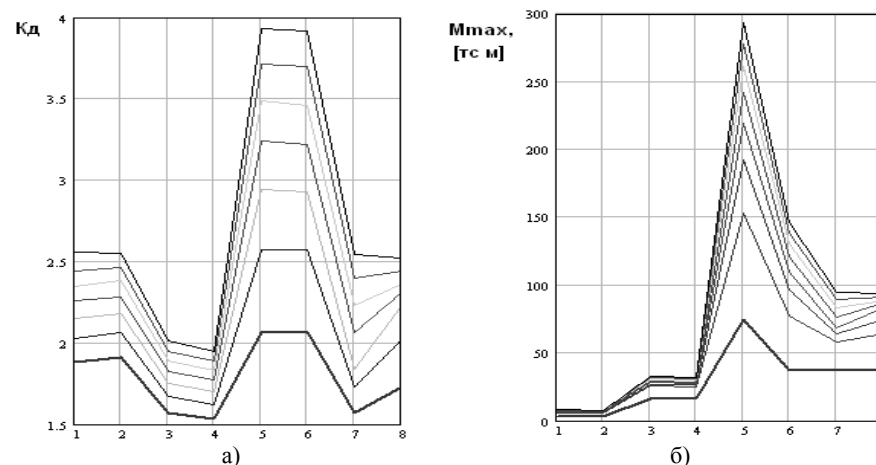


Рисунок 7 – Распределение  $K_d$  и  $M_{max}$  по линии привода клетки стана 1680

Можно заметить, что в данной клетке, восприимчивость к крутильным нагрузкам вала коренной муфты (5) и шестеренной клетки (6) больше, чем зацепления редукторов (2 и 4) при увеличении зазоров в обоих шпинделях. На участке коренной муфты располагаются узлы колебаний одного знака по двум собственным частотам 32 и 75Гц, что вызывает повышенный уровень динамики. Узлы колебаний на частотах 13 и 28Гц находятся на моторном валу и в зацеплении первого редуктора, что также приводит к увеличению на-

грузок на этом участке, сопоставимых с динамикой на шпиндельных валах.

Все технологические параметры режима прокатки с точки зрения динамики при захвате заготовок могут быть сведены к изменению только двух параметров: времени нарастания нагрузки, рассмотренного ранее, и величине статического момента прокатки. Экспериментально и теоретически было установлено влияние уровня статической нагрузки на динамический отклик нелинейной системы линии привода при наличии зазоров. При отсутствии зазоров, их малой величине или полном закрытии к моменту захвата зависимость  $M_{max}=M_{max}(M_{cm})$  является практически линейной ( $K_d=const$ ). В нелинейных системах с открытыми зазорами применяемый для оценки динамики коэффициент  $K_d$  содержит при вычислении неопределенность, особенно при раскрытии зазоров после первого периода колебаний и превышении второго пика над первым, а также при колебаниях статической нагрузки после захвата. По сути  $K_d$  является производной функции  $M_{max}=M_{max}(M_{cm})$ , поэтому необходимо учитывать, при каком значении  $M_{cm}$  он измерялся или рассматривается, иначе применение этого термина теряет смысл. В качестве примера приведены зависимости  $K_d$  и  $M_{max}$  от статической нагрузки  $M_{cm}$  для вала коренной муфты (см. Рисунок 8). Кривые имеют аналогичный вид для любой из упругих связей по линии привода, но с различными углами наклона. Нижние линии на графике – это линейная система без зазоров (эталон), верхние – максимальные зазоры в обоих шпинделях 0,012рад (6мм). Используя построенные зависимости, производится оценка динамических нагрузок в элементах линий привода с учетом износа.

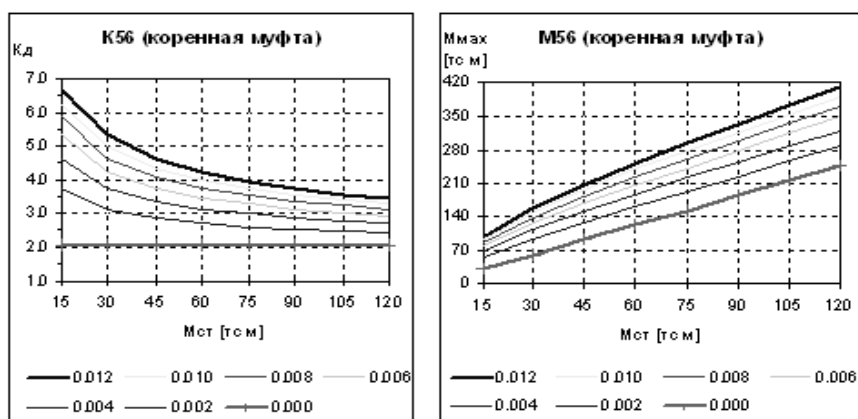


Рисунок 8 – Зависимости  $K_d$  и  $M_{max}$  в коренной муфте клетки дуо стана 1680 от статической нагрузки на валках при увеличении зазоров в обоих шпинделях

Нелинейные динамические модели позволяют вычислять также нагрузки не только в крутильной системе, но и в подшипниковых опорах валко, шестеренных клетей и редукторов. В отличие от известных моделей [12], учитываются круговые зазоры в опорах и различные податливости в горизонтальном

и вертикальном направлении крышек и болтовых креплений. Расчет переходных колебаний в опорах редукторов необходим для определения периодичности обтяжки болтовых креплений редукторов и шестеренных клетей, при ослаблении которых происходят поломки на внешних участках зубчатых зацеплений за счет перекосов валов.

Зависимость  $M_{max}=f(M_{cm})$  отклика нелинейной системы линии привода на входное воздействие при наличии зазоров можно приближенно описать квадратичной зависимостью вида:

$$M_{max}=A_2M_{cm}^2+A_1M_{cm}+A_0, \quad (1)$$

где  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  – постоянные коэффициенты для данного конструктивного исполнения, технического состояния и режима работы оборудования;  $M_{cm}$  – момент статической нагрузки на валках (момент прокатки).

Коэффициент  $A_0$  соответствует механическим потерям в линии привода,  $A_1$  отражает зависимость реакции линейной системы на входное воздействие, который в общепринятой трактовке имеет смысл  $K_d$  – коэффициента динамичности. Для линейной (идеальной) системы без зазоров величина  $A_1(K_d)$  в каждой упругой связи зависит только от соотношения упруго-массовых параметров линии привода, времени нарастания нагрузки и частично демпфирования (в том числе от электропривода). При появлении зазоров система становится нелинейной, ее реакция  $M_{max}$  проявляет непропорциональную зависимость от величины момента статической нагрузки  $M_{cm}$ , которая учитывается коэффициентом  $A_2$ .

Регистрируемые значения нагрузок имеют большой (до 50%) разброс даже при постоянном режиме прокатки и состоянии оборудования. Случайные изменения времени нарастания (за счет формы передней кромки металла) и состояния зазоров к моменту захвата приводит к необходимости статистического подхода при анализе динамических нагрузок. Представляют практический интерес зависимости между статистическими параметрами входной нагрузки (момент прокатки на валках) и отклика в линиях привода.

Случайная величина входной нагрузки  $M_{cm}$  на валках считается распределенной по нормальному закону. Среднее значение  $[M_{cm}]$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{M_{cm}}$  определяется по статической токовой нагрузке на достаточно представительной выборке. Тогда среднее значение  $[M_{max}]$  отклика определяется по известной формуле:

$$[M_{max}] = \int_{-\infty}^{\infty} M_{max} \cdot P(M_{cm}) \cdot dM_{cm}, \quad (2)$$

где  $P(M_{cm})$  – функция нормального закона распределения плотности вероятностей входной нагрузки  $M_{cm}$  (для простоты выводов взята центрированная переменная  $M_{cm}$  с нулевым средним значением, что не влияет на общность результата). Подставляя в (2) вместо  $M_{max}$  его значение из (1) и интегрируя по  $M_{cm}$  от 0 до  $\infty$ , получим:



$$[M_{\max}] = A_0 + A_2 \cdot \sigma^2_{Mcm}. \quad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что среднее значение  $M_{\max}$  нелинейной системы линейно зависит от дисперсии  $\sigma^2_{Mcm}$  входной нагрузки  $M_{cm}$ . Аналогично можно показать, что и дисперсия  $\sigma_{M\max}$  также зависит от дисперсии входной нагрузки  $\sigma_{Mcm}$  по формуле:

$$\sigma_{M\max} = A_1 \sigma^2_{Mcm} + 2A_2^2 \cdot \sigma^4_{Mcm}. \quad (4)$$

Полученные зависимости связывают отклонения технологических режимов прокатки с разбросом нагрузок в элементах линий привода.

**Методы диагностики зазоров в линиях привода.** На сегодняшний день, основным методом, применяемым в практической диагностике, является выделение амплитудной огибающей высокочастотного сигнала вибрации. Обязательным условием применимости метода является постоянная нагрузка и скорость привода (отклонение не более 5% при повторных измерениях). Многократное усреднение спектральных отсчетов в нестационарных режимах нагрузок и скорости может часто приводить к ложному диагнозу, а измерения на холостом ходе не выявляют скрытые дефекты. При этом каждая ложная ревизия снижает долговечность редуктора примерно на 10% из-за нарушения проработанных контактов. В связи с этим разработаны специальные методы диагностики зазоров в элементах линии привода, а для диагностики локальных дефектов зубчатых зацеплений и подшипников применяется синхронный анализ сигналов вибрации, что позволяет устранить зависимость от скорости привода. Предложены также методы диагностики в переходных режимах, когда появляются характерные по виду и частотному составу колебания (см. Рисунок 9). Раскрытие зазора в зацеплении редуктора аналогично небольшому ступенчатому возмущению на входном валу, в результате которого на осциллограмме момента нагрузки моторного вала появляется характерный диагностический признак. По виду переходного процесса с помощью модели можно точно определить, что "полочка" при переходе через ноль – это зазоры в муфтах моторного вала, а затухающие высокочастотные всплески – это зазоры в зацеплении редуктора.

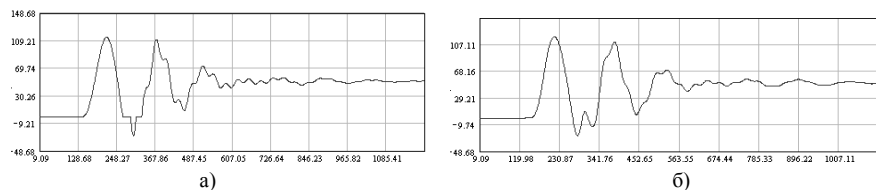


Рисунок 9 – Расчетные моменты сил упругости при раскрытии зазоров:  
а) в муфтах на моторном валу; б) в зацеплении входной ступени редуктора

**Телеметрический бесконтактный измеритель моментов\*.** Анализ существующих телеметрических систем различных производителей, выполненный в работе [13], а также собственный опыт эксплуатации аналогового измерителя моментов, разработанного ранее в ИЧМ, позволил разработать новый цифровой измеритель моментов с бесконтактным питанием на основе тензорезистивных датчиков в качестве первичных преобразователей деформации валов (см. Рисунок 10).



Рисунок 10 – Телеметрический измеритель моментов, установленный на нижнем шпинделе прокатного стана

В состав системы мониторинга кроме телеметрических измерителей с блоками бесконтактного питания входят также бесконтактные датчики углового положения валов (оптические и магнитные) в различных точках по линии привода, с помощью которых производится адаптация коэффициентов моделей (податливость упругих связей) по значениям деформаций участков линии привода при заданном уровне статической нагрузки [14].

### Выводы и перспективы дальнейших исследований.

1. Повышение надежности оборудования прокатных станов может быть достигнуто только на основе стационарных автоматизированных систем мониторинга механических нагрузок с использованием динамических моделей крутильных колебаний и вибрации подшипников.

2. Разработанная система мониторинга согласует интересы заказчиков и поставщиков оборудования при проектировании и назначении гарантийных сроков. Заказчики, имея данные о фактических нагрузках, могут обоснованно выдвигать требования по пределам прочности агрегатов, а поставщики, смогут проверять условия эксплуатации при гарантийном обслуживании, выявлять отклонениями технологии или качества монтажа узлов у заказчика.

3. Предложенные методы обработки и формы представления данных о нагрузках в станах горячей прокатки раскрывают механизмы их формирования и дают возможность технологам и механикам совместными усилиями оптимизировать режимы обработки металла с точки зрения надежности отдельных клетей и всего непрерывного стана в целом.

\* Разработка схемы измерителя выполнена совместно с инж. Рахно Е.П.

Перспективным является направление исследований по снижению динамических нагрузок в прокатных станах путем введения обратной связи в системе управления главного электропривода от измерителя крутильных моментов. Такое техническое решение уже было известно ранее, но его практическая реализация сдерживалась отсутствием надежных с малым уровнем шума телеметрических измерителей крутильных колебаний в стационарном исполнении и бесконтактным питанием, которые могут работать на шпинделях прокатных станов при повышенной температуре, влажности, металлизированной пыли и масляных испарений.

Необходима также разработка методической базы (возможно в виде ДСТУ) регламентирующей процедуры измерения крутильных колебаний в линиях привода прокатных станов различного типа и методов ее нормирования для оценки нагрузочной способности и долговечности оборудования, как это выполнено в стандартах для судовых приводов [15].

**Список литературы:** 1. Правила технической эксплуатации механического оборудования непрерывных широкополосных станов горячей прокатки (НШСПП). – ВНИИмехчермет, 1982. 2. Крот П.В. Проблемы управления технической эксплуатацией оборудования прокатных станов / Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ. – Вып.10 – К.: Наукова думка, 2005. – С.314-321. 3. Широкий мониторинг листопрокатного завода Voestalpine Stahl / Зайцек Х., Айгнер Х., Хелекал Г. // METEC Congress-2003, Dusseldorf, 16-20 June, 2003. – С.419-422. 4. Создание системы мониторинга прокатного оборудования / Вафин Р.К., Ахмедшин Р.И., Мальцев А.И. и др. // Сталь. – 2001. – №11. – С.62-64. 5. Система компьютерного мониторинга параметров оборудования и электроприводов агрегатов металлургического производства. / Евдокимов С.А., Карандаев А.С. и др. // Материалы IV Конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 2002. – С.278-280. 6. Система мониторинга механических нагрузок стана горячей прокатки 1680 по токовым нагрузкам электроприводов / Крот П.В., Соловьев К.В., Коренной В.В., и др. // Сб. научных трудов НГУ. – №19, т.5. – Днепропетровск: Нац. горный университет, 2004. – С.71-76. 7. Барков А.В. Возможности современных систем мониторинга и диагностики оборудования // Металлург. – 1998. – №11. – С.33-36. 8. Верев В.В. Диагностика технического состояния оборудования по данным вибродинамических процессов в переходных режимах работы прокатных станов // Труды 4-го Конгресса прокатчиков. – Россия, Магнитогорск, 2001. 9. Применение нестационарных режимов работы прокатных станов для диагностики зазоров / Большаков В.И., Крот П.В. и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов. – Вып.9 – К.: Наукова думка, 2004. – С.208-220. 10. Вибродиагностика прокатных станов в диапазоне собственных частот колебаний / Крот П.В., Даличук А.П., Коренной В.В., Соловьев К.В. // Материалы 12-ой ежегодной международной конференции "Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики". – 20-24 сентября, 2004г. – С.124-126. 11. Krot P.V. Statistical Dynamics of the Rolling Mills // IUTAM 2009 Symposium on the Vibration Analysis of Structures with Uncertainties. July 6–10, 2009, St. Petersburg. – IUTAM Bookseries, 2011. – Volume 27, Part 4. – Pp.429-442. 12. Определение нагрузок в шестеренных клетях и редукторах прокатных станов / Филатов А.А., Гарцман С.Д. и др. // Сталь. – 2003. – №8. – С.41-45. 13. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – Вып.1. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – С.46-53. 14. Крот П.В. Методы и аппаратура измерения износа в линиях привода прокатных станов // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – №2(12). – С.45-53. 15. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – С-Пб.: Наука, 2007. – 276с.

Поступила в редколлегию 31.05.11

УДК 621.833

А.В. КУЗНЕЦОВА, аспирантка каф. ОПМ ДонНТУ, г Донецк

## ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА ДВОЯКОВЫПУКЛО-ВОГНУТЫХ ЗУБЬЕВ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ НА КОНТАКТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Исследовано влияние износа зубьев конических колес с двояковыпукло-вогнутыми зубьями на радиусы кривизны боковой поверхности зубьев и контактные напряжения в передаче. Приведены модели зубьев изношенной зубчатой передачи угольного комбайна РКУ10.

Досліджено вплив зношування зубців конічних коліс із двоопукло-ввігнутими зубцями на радіуси кривизни бічної поверхні зубців і контактні напруги в передачі. Наведено моделі зубців зношеної зубчастої передачі вугільного комбайна РКУ10.

The influence of biconvex-concave teeth wear of bevel gears on the curvature radiuses of the teeth lateral surface and contact stresses in gear was investigated. A model of the worn gear teeth of coal shearer RKU10 is shown.

**Постановка проблемы.** Конические зубчатые передачи с двояковыпукло-вогнутыми зубьями (ДВВ-зубьями) [1] в последнее время стали активно применять для повышения надежности редукторов горных машин. Преимуществами конических колес с ДВВ-зубьями являются высокая нагрузочная способность, большая плавность зацепления и значительное снижение шума. В настоящее время исследования износа зубьев конических передач с ДВВ-зубьями не производятся в отличие от цилиндрических эвольвентных передач [2]. В связи с тем, что износ зубьев оказывает значительное влияние на динамику зубчатых передач, прогнозирование изменения качественных характеристик конических зубчатых передач с ДВВ-зубьями в зависимости от времени их эксплуатации является актуальным.

**Цель работы** – оценить влияние износа зубьев конических передач с ДВВ-зубьями на контактную прочность рабочих поверхностей зубьев.

**Основное содержание работы.** Для решения поставленной задачи были определены координаты изношенной поверхности зуба методом лазерного сканирования, предложенным учеными института робототехники и управления технологическими процессами технического университета Брауншвейга Симоном Вилькенбахом, Свенном Молкенстраком, Фридрихом М. Войле [3].

В данной работе исследование износа зубьев проводилось на базе анализа зацепления зубчатой передачи угольного комбайна РКУ10 производства ЗАО "Горловский машиностроитель" (г. Горловка, Донецкая обл., Украина). Параметры исследуемой передачи представлены в таблице.

Трехмерные модели зубчатых колес изношенной зубчатой пары (рисунок 1) реализованы с помощью системы автоматизированного трехмерного проектирования.